

基于 Landsat TM/ETM⁺ 数据提取巢湖悬浮泥沙相对浓度的信息与空间分布变化*

王心源^{1,2}, 李文达^{2,3}, 严小华⁴, 陆应城⁵, 周鑫^{2,3}, 李祥^{1,2}, 夏林益^{1,2}, 唐晓光⁶, 梅长青^{2,3}

(1: 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241000)

(2: 安徽省遥感考古工作站, 芜湖 241000)

(3: 安徽师范大学环境科学学院, 芜湖 241000)

(4: 安徽省巢湖市气象局, 巢湖 238000)

(5: 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

(6: 安徽省巢湖市环境监测站, 巢湖 238000)

摘要: 悬浮泥沙是重要的水质参数之一。应用遥感技术监测悬浮泥沙, 学者们提出了众多的悬浮泥沙遥感的经验模型和推导模型。但在缺乏大气参数或没有足够实测数据的情况下, 这些模式的精度和准确性得不到保证。针对这种情况, 以巢湖为实验区, 对三景的巢湖卫星遥感数据进行了如下的数据处理: (1) 利用内部平均相对反射率法进行图像的大气校正, 得到的相对反射率与真实反射率具有相似的波谱特征; (2) 对图像进行了水体提取、二值化、掩膜处理, 并通过湖泊泥沙指数 $SI = (TM2 + TM3) / (TM2 / TM3)$ 提取了 TM 数据下的泥沙信息, 得到水体含沙量图; (3) 按照本文提出的基于遥感图像的不同浓度等级泥沙的划分依据, 在泥沙指数图上进行密度分割处理, 得到了巢湖泥沙相对浓度分布图。在上述的处理基础上, 利用谱间关系法对巢湖水体进行准确提取; 结果表明, 与实测资料对比, 巢湖泥沙相对浓度分布与验证数据一致, 实测数据和 SI 值相关系数为 0.89 (置信度水平在 0.001), 表明泥沙指数方法可以直观和定量地反映悬浮泥沙相对浓度的分布与变化; 研究结果显示, 1987-2000 年间, 巢湖高浓度悬浮泥沙范围增大了约 1.5 倍。通过影像差值图清楚地识别出变化区域, 主要位于西湖的中心、河口入湖区和东湖的南岸, 这种变化的最主要原因是由于各入湖河流携带的大量悬浮泥沙进入水体, 其次是岸坡崩塌物形成的。

关键词: 悬浮泥沙; 泥沙指数; 信息提取; 巢湖

Information extraction for suspended sediment in Lake Chaohu and its distribution based on Landsat TM/ETM⁺ data

WANG Xinyuan^{1,2}, LI Wenda^{2,3}, YAN Xiaohua⁴, LU Yingcheng⁵, ZHOU Xin^{2,3}, LI Xiang^{1,2}, XIA Linyi^{1,2}, TANG Xiaoguang⁶ & MEI Changqing^{2,3}

(1: College of Land Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, P. R. China)

(2: Work Station of Anhui Province for Remote Sensing Archaeology, Wuhu 241000, P. R. China)

(3: College of Environment Science, Anhui Normal University, Wuhu 241000, P. R. China)

(4: Chaohu City Meteorological Bureau, Chaohu 238000, P. R. China)

(5: International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093 P. R. China)

(6: Chaohu City Environment Inspection Station, Chaohu 238000, P. R. China)

Abstract: To detect suspended sediment by remote sensing technology, researchers have brought up various kinds of experiential or deductive models. The precision and/or accuracy of these models is, more often than not, unable to be assured due to the lack of atmospheric parameters or enough statistics. In this paper, we take Lake Chaohu as an example area, and process the TM data of Lake Chaohu as follows: (1) we get the similar spectrum character be-

* 国家自然科学基金 (40571162) 和安徽省自然科学基金 (050450401) 联合资助。2006-04-19 收稿; 2006-09-22 收修改稿。王心源, 男, 1964 年生, 教授; E-mail: xinyuanw57@vip.sina.com.

tween the relative reflection rate and the actual reflection rate by the atmospheric correction which is called the internal average relative reflectance; (2) we get the map of water with different sediment levels by extracting water, creating a map with 0/1 encoding, masking and acquiring a map of $SI = (TM2 + TM3) / (TM2 / TM3)$; (3) we get the map of suspended sediment relative distribution by applying the density slicing to the map of SI with the criteria for the classification. The results show that: (1) we can get an accurate extraction of water information from Lake Chaohu by the way of considering the relationship between the spectrum; (2) The relative suspended sediment revealed are in accordance with the instrumental data *in situ*. (3) According to the remote sensing image, the high-level suspended sediment areas had expanded, i. e. 1.5 times larger during the past 13 years, indicating certain changes of lake's estuary, lake shoreline and the suspended sediment content. (4) The comprehensive survey shows that the main source of suspended sediment of Lake Chaohu is from the river transportation, and from leftovers caused by the erosion of lakeshore.

Keywords: Suspended sediment; sediment parameter; information extraction; Lake Chaohu

悬浮泥沙是重要的水质参数之一,其大小直接影响水体透明度、浑浊度、水色等光学性质及水生生态条件,其含量及动态变化对该区的水下地貌的发展及冲淤变化等具有非常重要的影响. 因此悬浮泥沙含量的调查对湖岸带的水质、地貌、生态、环境的研究以及沿岸工程、港口建设等都具有重要的意义. 常规的调查方法是用船逐点采样、分析,调查速度慢、周期长,且只能获得在时间、空间分布上都很离散的少量点的数据,而河口湖岸地区水流情况复杂多变,悬浮泥沙含量的时间变化率很大,这种在时、空分布上很离散的采样数据对比精度很差,使研究者难于对大面积水域悬浮泥沙含量的分布和变化有连续性的、同步的确实认识. 卫星遥感技术的发展使这一状况得到了彻底的改观,遥感具有大尺度快速同步的特点. 所获得的水体悬沙流态影象,都是在几秒至几十秒,或更短的时间内瞬时同步扫描或摄制的. 这种瞬时同步影象,对于研究湖面悬沙的输移和沉降,是非常直观和有用的资料. 采用遥感技术能迅速地获得大面积水域悬浮泥沙含量的资料,瞬间同步性极好,重复获取数据的周期短,能有效地监测悬浮物含量特别是含沙量的分布和动态变化,克服了常规方法的不足,具有十分重要的研究价值.

目前,国内外许多学者对应用遥感技术监测悬浮泥沙的研究已经做了大量的工作^[1-3],提出了众多的悬浮泥沙遥感定量模式,主要有经验模型和推导模型两大类^[4,5]. 这些模型都含有一些未知参数,要由实测数据来拟合,并且每种模式都要做精确的大气校正. 因此在缺乏大气参数或没有足够实测数据的情况下,这些模式的精度和准确性得不到保证. 针对这种情况,本文以巢湖为实验区,利用相对大气校正方法,分析该湖区不同等级浓度含沙水体的光谱特征,提出了一种不需要实测资料来提取悬浮泥沙信息的指数方法. 并利用实测资料对此方法的分类结果进行了检验和分析.

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

巢湖位于中国的东部,为中国五大淡水湖之一,形态呈鸟巢状,东西长 54.5 km,南北平均宽度 15.1 km,平均水深 2.4 km,主要有南淝河、派河、杭埠河、丰乐河、柘皋河等 6 条河流汇入,由裕溪河注入长江(图 1). 入湖径流量占巢湖水量的 98%,它们带来了大量的泥沙入湖,每年平均入湖泥沙量高达 260×10^4 t,其中 61.54% 淤积于湖盆内,是湖区中悬浮与沉淀泥沙的主要来源,其次为湖岸崩塌带来的泥沙,占年入沙量的 29%,湖区总悬浮物含量较高,透明度较低^[6].

1.2 研究方法

对于水环境遥感分析而言,消除大气影响很重要. 在过去的 20 多年,陆续发展了一些大气校正模型^[7-10]. 大致可以归纳为基于图像特征的相对校正法、基于地面线性回归模型法、基于大气辐射传输模型法和复合模型法 4 种. 以辐射传输理论为基础的大气校正模型能得出比较精确的结果,但其计算比较复杂,并且需要卫星过境时的大气参数. 对于大多数的研究而言,要获得这些大气参数是不可能的. 所以这里利用不需要外部输入的内部平均相对反射率法进行图像的大气校正,即将图像各波段的每个像元除以该波

段整个图像灰度值的平均值,得到视反射率图像.该方法消除了大气程辐射和部分地形的影响^[11],得到的相对反射率与真实反射率具有相似的波谱特征.在2000年的Landsat ETM⁺影像的R4G3B2合成波段图像上采点得到如图2所示的视反射率波谱特征图.可以看出,含泥沙的水体在TM2和TM3反射率较高,这与前人研究的结果^[12];不同含沙量水体的反射峰值均集中在0.55–0.7 μm之间相吻合.因此利用TM2和TM3波段的影像灰度就可以反映水体泥沙含量的差异.分析两个时相的TM2和TM3波段在泥沙高、低浓度区的灰度响应曲线,发现在一定水深内TM3波段影像对泥沙的灵敏度高于TM2,随着水深的增加,TM2波段影像对泥沙的灵敏度急剧增加比TM3波段表现好.因而综合利用TM2波段高透射能力和TM3波段的高反射率特征,把影像灰度叠加可以使水体灰度差异变的更显著.同时TM2也是处于叶绿素的反射峰.为了能全面提取泥沙信息,可以采用泥沙指数的办法^[13].我们在此尝试性地提出用 $SI = (TM2 + TM3) / (TM2/TM3)$ 的值作为泥沙指数来提取Landsat TM图象的泥沙信息,得到水体含沙量图.

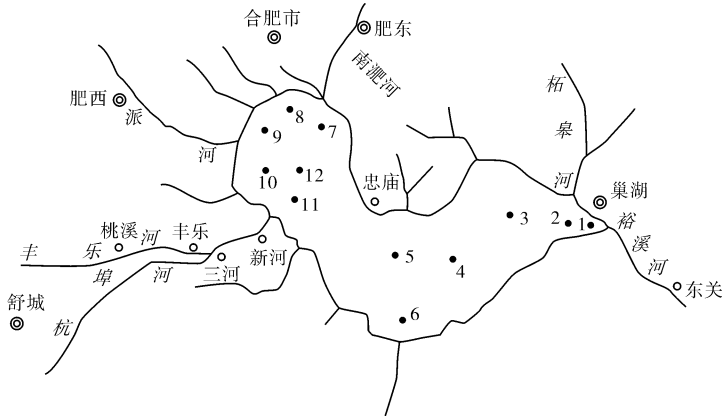


图1 巢湖水系

(水质监测点——1. 巢湖坝口; 2. 造船厂; 3. 中捍乡; 4. 湖心点; 5. 姥山东3 km; 6. 马尾河口; 7. 南淝河入湖区; 8. 十五里河入湖区; 9. 塘西; 10. 派河入湖区; 11. 新河入湖区; 12. 西半湖心)

Fig. 1 Lake Chaohu water system

通过对巢湖地区典型地物光谱特征曲线研究发现,只有水体的光谱特征具有 $TM2 + TM3 > TM4 + TM5$ 的特征,为此,我们用谱间关系法提取巢湖水体,提取效果很好.按黄华兵等提出的方法^[14]得到了含有泥沙的水体信息.最后通过泥沙指数得到了水体含沙量图.接下来的工作是悬浮泥沙的分类,其分类标准是最难确定的,即 SI 取多大时为高悬浮泥沙,取何值时为低悬浮泥沙.通过不断的尝试和比较,发现 SI 的平均值和标准差可以作为半定量指标.因此,在本研究中我们采用下面的指标作为划分不同悬浮物浓度水体的标准(M 代表平均值, D 代表标准方差): $SI > M + D$,高悬浮泥沙水体; $M < SI \leq M + D$,中悬浮泥沙水体; $M - D < SI \leq M$,低悬浮泥沙水体; $MIN < SI \leq M - D$,清洁水体.

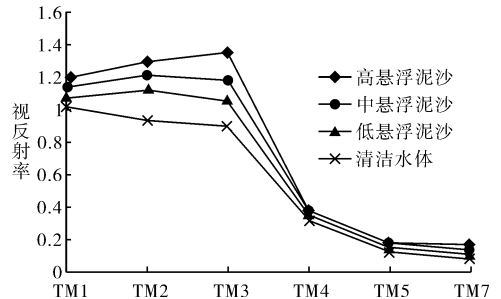


图2 水体视反射率

Fig. 2 The water apparent reflection

2 结果分析

以上操作均由Erdas8.5中的Modeler来实现.本文以2000年2月的ETM⁺图像、2000年11月的ETM⁺图像和1987年5月的TM图像作为遥感信息源,代表巢湖的平水-枯水期.通过对该三景图像的信息提取,得到了这三年的悬浮泥沙相对分布(图3-图5).最后用2000年2月份悬浮物浓度的实测数据来对模

型进行检验,由表1可以发现实测数据和SI值呈很好的对应关系,相关系数为0.89,置信度水平在0.001上.并在悬浮泥沙相对分布图上得到了反映.这说明由泥沙指数法提取的巢湖湖区悬浮泥沙相对分布图与实际情况比较吻合,能有效的反映湖区的实际情况.

表1 实测值与图象灰度值对应关系

Tab.1 the actual value and picture value correspondence relations

监测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SS	83	23	66	130	30	28	20.4	30	34.8	40.2	44.2	37.2
SI值	75	40	58	96	25	26	17	25	30	36	38	31

表2 1987年5月、2000年2月、2000年11月巢湖悬浮泥沙分级面积变化

Tab.2 Spatial distribution of suspended sediments in May 1987, February 2000 and November 2000, Lake Chaohu

分级	1987年		2000年2月		2000年11月	
	面积(km ²)	百分率(%)	面积(km ²)	百分率(%)	面积(km ²)	百分率(%)
高悬浮泥沙	69.94	8.1	101.8	13.17	87.67	11.24
中悬浮泥沙	313.02	36.25	285.78	36.97	385.16	49.38
低悬浮泥沙	355.07	41.12	216.98	28.07	142.12	18.22
清洁水体	125.47	14.53	168.44	21.79	165.05	21.16
汇总	863.5	100	773	100	780	100

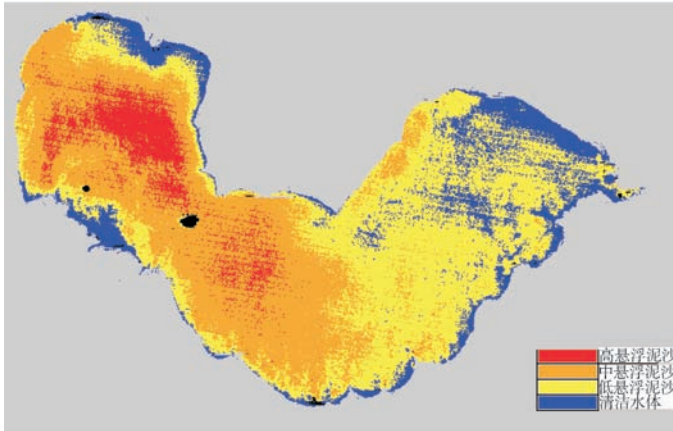


图3 1987年5月悬浮泥沙相对分布

Fig.3 The relative distribution of suspended sediments in May 1987

以上研究反映了1987-2000年悬浮泥沙浓度的变化,为了更清楚地说明这种变化,对数据和图表进行了进一步分析:

(1)1987-2000年巢湖高浓度悬浮泥沙范围在增大.即便枯水季节,2000年2月的高浓度悬浮泥沙与11月的高浓度悬浮泥沙也有不同,说明巢湖水体泥沙含量的不稳定性,表明水土流失以及湖水体泥沙含量不仅随年份而且随季节变化明显.实际资料也显示,巢湖这10年累计泥沙淤积量 225×10^4 t,巢湖流域近40年来水土流失量是不断增加的,每年平均递增率为2.9% (表3)^[15].

(2)悬浮泥沙浓度增加的地区主要位于西湖的中心、河口入湖区和东湖的南岸.结合地面调查知道,西湖中心的高悬浮泥沙来源主要是杭埠河、丰乐河、派河、白石山河带入的,东湖南岸的悬沙分布带主要是

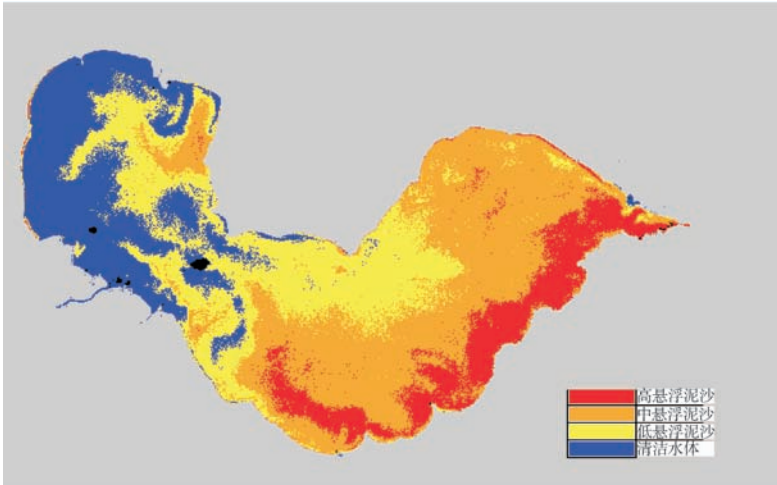


图 4 2000 年 2 月悬浮泥沙相对分布

Fig. 4 The relative distribution of suspended sediments in February 2000

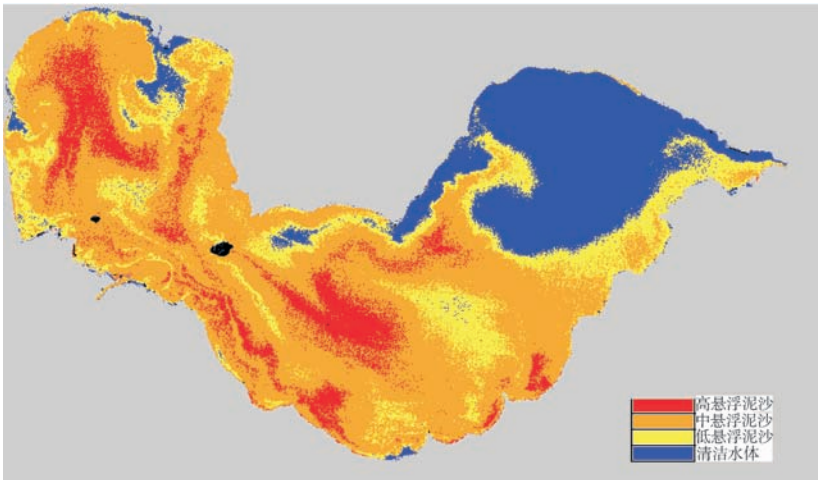


图 5 2000 年 11 月悬浮泥沙相对分布

Fig. 5 The relative distribution of suspended sediments in November 2000

湖岸崩塌造成的^[19,20]。前人的研究成果表明,巢湖泥沙的来源主要是各入湖河流携带的泥沙,其次是岸坡崩塌物形成的。根据航片分析,现代巢湖泥沙主要来自杭埠河、丰乐河、派河、白石山河、柘皋河等 6 条河^[16,18]。这也证实了以上遥感分析的结论。通过对比分析巢湖泥沙相对分布图与巢湖淤积图^[17],可以看出高悬浮泥沙的分布与巢湖的现代淤积也呈很好的对应关系,

(3)在各河流入湖口泥沙含量相对较高尤其是杭埠河口存在着一个大范围的中浓度悬沙分布带,其扩散范围约 40-50 km,它与河口的淤积变化有着密切的关系,为此对比 1955 年航片与 1987 年的 TM 影像和 2000 年 ETM⁺ 影像,发现杭埠河河口泥沙淤积严重,这主要是因为河流水体含沙量入湖大而且不断被围垦,形成了鸟足状三角洲,反映了河口、岸线的不断演变。

(4)西湖中心的高浓度悬浮泥沙有减少的趋势,而东湖南岸的高浓度悬浮泥沙有增加的趋势,故从总的趋势看,各入湖河流的治理取得了一定的效果,应注意加强对湖岸崩塌的治理。实现环巢湖经济的可持续发展。

致谢:对提供资料的安徽省环境监测站和巢湖市环境监测站表示感谢!

3 参考文献

- [1] 李京. 水域悬浮物固体含量的遥感定量研究. 环境科学学报, 1986, 6(2): 166 - 173.
- [2] 马荣华, 戴锦芳. 结合 Landsat ETM 与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量. 湖泊科学, 2005, 17(2): 97 - 103.
- [3] 吕恒, 李新国, 江南. 基于反射光谱和模拟 MERIS 数据的太湖悬浮物遥感定量模型. 湖泊科学, 2005, 17(2): 104 - 109.
- [4] 黎夏. 悬浮物泥沙遥感定量的统一模式及其在珠江口中的应用. 环境遥感, 1992, 7(2): 106 - 113.
- [5] 阳峰, 沈晓华, 邹乐君. 非线性函数拟合算法在遥感泥沙定量模式中的应用. 遥感技术与应用, 2003, 18(3): 138 - 143.
- [6] 李素菊, 王学军. 巢湖水体悬浮物含量与光谱反射率的关系. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 66 - 68.
- [7] 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正方法综述. 遥感信息, 2004(4): 66 - 70.
- [8] 亓雪勇, 田庆久. 光学遥感大气校正研究进展. 国土资源遥感, 2005, (4): 1 - 6.
- [9] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10] 丁丽霞, 周斌, 王人潮. 遥感监测中 5 种相对辐射校正方法研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, (3): 269 - 276.
- [11] Kruse F A. Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the Northern Grapevine Mountains, Nevada. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24: 31 - 35.
- [12] 荀毓龙. 遥感基础试验与应用. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 205 - 208.
- [13] 李四海, 恽才兴. 河口表层悬浮泥沙气象卫星遥感定量模式研究. 遥感学报, 2001, (2): 154 - 160.
- [14] 黄华兵, 马海州, 沙占江等. 基于 RS 的龙羊峡库区悬浮泥沙分布研究. 盐湖研究, 2004, 12(4): 34 - 57.
- [15] 朱湖根, 王大齐. 巢湖泥沙淤积预测与防治. 水土保持通报, 1991, 11(4): 15 - 19.
- [16] 杨则东, 徐小磊, 谷丰. 巢湖湖岸崩塌及淤积现状遥感分析. 国土资源遥感, 1999, (4): 1 - 7.
- [17] 王良华. 巢湖支流口门区湖滩段航道整治工程. 水运工程, 1998, (1): 32 - 36.
- [18] 李文达, 王心源, 周迎秋等. 利用 TM 影像分析巢湖悬沙分布及其原因. 水土保持研究, 2006, (2): 179 - 181.
- [19] 高超, 王心源, 杨则东等. 巢湖崩塌岸成因初步研究. 水土保持研究, 2005, 12(2): 49 - 51.
- [20] GAO Chao, WANG Xinyuan, YANG Zedong *et al.* Causes and countermeasures for Chaohu Lakeshore collapse. *Chinese Geographical Science*, 2005, 15(1): 88 - 93.